

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Návrh a pevnostní analýza komínové konstrukce

Design and Stress Analysis of Smokestack Construction

Student:

Michal Drozd

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Richard Klučka

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Drozd

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Návrh a pevnostní analýza komínové konstrukce
Design and Stress Analysis of Smokestack Construction

Zásady pro vypracování:

Zkoumaným technickým objektem je komín pro odvod spalín. Technickým problémem je provedení návrhu tloušťek plechů pro komín požadovaných rozměrů a provedení pevnostní analýzy.

K řešení technického problému má být použita metoda počítačového modelování.

Postup řešení:

- provedení analýzy komínu podle technické dokumentace a stanovení jeho podstatných vlastností z hlediska řešeného problému,
- návrh tloušťek plechů,
- sestavení výpočtového modelu,
- provedení výpočetních simulací,
- vyhodnocení výsledků.

Examined technical problem is a smokestack, used as an outlet for combustion products. The main aim is to perform a wall thickness proposal and stress analysis for particular smokestack with given dimensions.

For solving the problem shall be used FE method.

The solving process:

- Performing the stress analysis according to given technical documentation and determination of its crucial properties
- Wall thickness proposal
- Creation of FE model
- Realization of FE simulations
- Evaluation of results

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Technická dokumentace komínu
- [2] Němec, J., Dvořák, J., Hoschl, C. Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Praha 1989
- [3] Janíček, P., Ondráček, J., Vrbka, J. Mechanika těles - pružnost a pevnost I., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1987
- [4] Ondráček, J., Vrbka, J., Janíček, P. Mechanika těles - pružnost a pevnost II., Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1988

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Klučka**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Michal Drozd

Adresa trvalého pobytu autora práce: V. Vlasákové 946/18, Ostrava – Jih, 700 30

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DROZD, M. *Návrh a pevnostní analýza komínové konstrukce : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2013, 45 s. Vedoucí práce: Klučka, R.

Bakalářská práce se zabývá návrhem tloušťek plechů komínové konstrukce a následnou pevnostní analýzou navržené konstrukce. V úvodu je popsána funkce komínu a vnější vlivy působící na komín. Pro návrh tloušťek plechů je použito předběžného analytického výpočtu na zjednodušeném výpočtovém modelu. Poté je provedena pevnostní analýza metodou konečných prvků na 3D modelu v software Ansys Workbench 13.0. Zadaným kritériím vyhovuje tloušťka plechu 5 mm.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DROZD, M. *Design and Stress Analysis of Smokestack Construction : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2013, 45 p. Thesis head: Klučka, R.

Bachelor thesis deals with the design of wall thicknesses of smokestack construction and with the stress analysis of designed construction. The introduction describes function of smokestack and external effects acting on smokestack. The preliminary analytic calculation is used for determination of wall thickness on the simplified computational model. Thereafter is performed stress analysis by the Finite element method on the 3D model in software Ansys Workbench 13.0. Designed wall thickness of 5 mm satisfies for the specified criteria.

Obsah

1	POPIS TECHNICKÉ SOUSTAVY	9
2	FORMULACE TECHNICKÉHO PROBLÉMU A POSTUP ŘEŠENÍ	11
3	ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – PŘEDBĚŽNÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET	12
3.1	ÚPRAVY PŘED VÝPOČTEM.....	14
3.2	VÝPOČTOVÝ MODEL.....	20
3.3	POSTUP VÝPOČTU	21
3.4	VÝPOČET	22
3.5	ZÍSKANÉ ŘEŠENÍ	29
4	ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – PEVNOSTNÍ VÝPOČET POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ.....	30
4.1	GEOMETRICKÝ MODEL	30
4.2	MATERIÁLOVÝ MODEL	31
4.3	DISKRETIZACE GEOMETRICKÉHO MODELU – SÍŤOVÁNÍ	32
4.4	KINEMATICKÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY	33
4.5	SILOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY	34
4.6	ZÍSKANÁ ŘEŠENÍ.....	34
5	ZÁVĚR	43
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44

Seznam použitých značek a symbolů

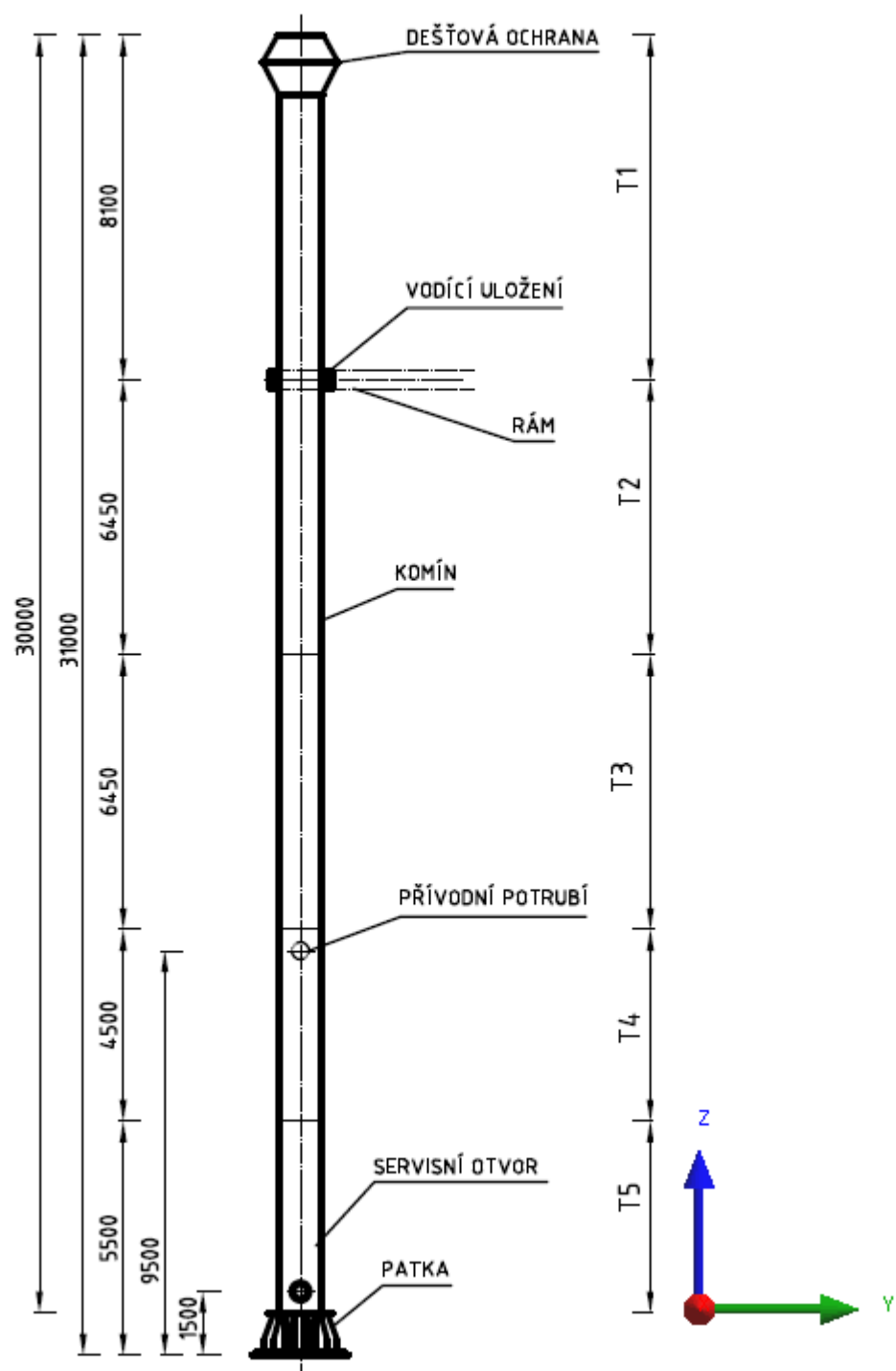
Označení	Legenda	Jednotka
F	Síla	[N]
I_v	Intenzita turbulence	[-]
J	Kvadratický moment setrvačnosti	[m ⁴]
M_O	Ohybový moment	[N.m]
W_O	Modul průřezu	[m ³]
R	Reakce	[N]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
S	Plocha průřezu	[m ²]
c_0	Součinitel ortografie	[-]
c_{dir}	Součinitel směru větru	[-]
c_r	Součinitel drsnosti terénu	[-]
c_{season}	Součinitel ročního období	[-]
g	Gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
k_i	Součinitel turbulence	[-]
k_r	Součinitel terénu	[m]
k_s	Koeficient bezpečnosti	[-]
q_p	Maximální dynamický tlak	[N.m ⁻²]
q_x	Lineární tlak	[N.m ⁻¹]
v_b	Základní rychlost větru	[m.s ⁻¹]
$v_{b,0}$	Střední rychlost větru	[m.s ⁻¹]
v_m	Střední rychlost větru	[m.s ⁻¹]
z_0	Třecí výška	[m]
z_{min}	Výška konstantní rychlosti	[m]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	Hustota oceli	[kg.m ⁻³]
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
σ_D	Dovolené napětí	[MPa]
σ_O	Ohybové napětí	[MPa]
σ_T	Tlakové napětí	[MPa]

1 POPIS TECHNICKÉ SOUSTAVY

Komín slouží k odvodu spalin z průmyslového zařízení, proto musí mít dostatečnou výšku, aby byl zajištěn účinný odtah spalin. Komín, řešený v této práci má na výšku 31 m a stojí vně průmyslové budovy. Žádná část komínu nevystupuje mimo zákryt budovy, svojí výškou nepřesahuje vrch budovy. Je v minimální vzdálenosti 1,2 m od stěny budovy a ve výšce 21 m nad zemí je ukotven rámovou konstrukcí. Uložení v rámu je posuvné. Komínové těleso je ze čtyř stran s minimální vůlí opřeno o vodící rám. Tělo komínu je rozděleno do pěti, přibližně stejně dlouhých segmentů. Komín je vystaven působení větru po celé jeho výšce s proměnlivou hodnotou tlaku.

Části komínové konstrukce (viz. obr.1):

- komín – válcovaný plech ocelový
- vodící uložení (vedení) – svařenec z ocelových profilů U
- patka – ocelová, po obvodu vyztužená žebry
- přívodní potrubí – ocelová trubka
- servisní otvor – vyvedení krátké trubky, které je zaslepeno přírubou – ocel
- dešťová ochrana – ocelový plech



obr. 1 Popis komínu

2 FORMULACE TECHNICKÉHO PROBLÉMU A POSTUP ŘEŠENÍ

Posuzuje se pevnost komína při maximálním dynamickém zatížení větrem. Jelikož komín je souměrný v jedné ose a předpokládá se nejvyšší tlak větru v jednom směru, tak bude pro výpočet uvažováno zatížení pouze v jednom směru a orientaci na komín. Bude uvažován koeficient bezpečnosti 1,5. Z maximálního dovoleného napětí, při uvážení koeficientu bezpečnosti, se stanoví minimální tloušťky plechu jednotlivých částí komínu. Tento výpočet se provede analyticky (předběžný - návrhový) na zjednodušeném modelu. Poté se v CAD software vytvoří prostorový model a se zjištěnými tloušťkami plechu se komín vypočte ve výpočetním software metodou konečných prvků (dále jen MKP). Zjistí se, jestli nebyla překročena dovolená napětí, pokud ano, upraví se tloušťky plechu na výpočtovém modelu a výpočet MKP se provede ještě jednou. Tímto iteračním postupem se docílí optimalizovaných tloušťek plechů.

Uvažují se tyto podmínky:

- tuhá patka (pouze pro analytický výpočet)
- spaliny mají teplotu okolí
- spaliny volně odcházejí
- v komínovém tělese nevzniká přetlak ani podtlak

3 ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – PŘEDBĚŽNÝ ANALYTICKÝ VÝPOČET

Úloha se řešila jako tenký přímý nosník zatížený ohybem, na jedné straně dokonale vetknutý (vazba odebrává v rovině 3 stupně volnosti) a s kluzným kloubovým uložením ve výšce 21 m (vazbou odebrán 1 stupeň volnosti). Jedná se tedy o 1x staticky neurčitou úlohu. Do výpočtu nebyla uvažována patka, pouze část od ní (dokonalé vetknutí – patka díky své konstrukci má velkou tuhost oproti zbývajícím částem komínu, proto byl stanoven tento zjednodušující předpoklad).

Při výpočtu neznámé reakce byla využita Castiglianova věta. Je to energetická metoda, vhodná pro výpočet staticky neurčitých konstrukcí. Díky této metodě je možné spočítat reakce, pro které nestačí statické rovnováhy sil a rovnováhy momentů (3 rovnice pro rovinou úlohu, 6 pro prostor). Lze také stanovit posuvy a natočení v konkrétních bodech. Princip výpočtu neznámé reakce spočívá v tom, že se staticky neurčitá soustava převede na fiktivní staticky určitou, tím, že původní vazba se nahradí reakcemi a toto místo pak určuje okrajovou podmínku danou skutečnou vazbou, jako je nulový posuv nebo nulové natočení nosníku.

Odvození Castiglianovy věty^[3]:

Deformační energie pružných těles je funkcí zobecněných posuvů

$$\delta U = \sum_{k=1}^n \frac{\partial U}{\partial q_k} \delta q_k \quad (3.1)$$

Celková virtuální práce vnějších sil

$$\delta A = \sum_{k=1}^n Q_k \delta q_k \quad (3.2)$$

kde

δq_k ...nekonečně malý zobecněný posuv, deformace tělesa

Q_k ...zobecněná síla

Práce vnějších sil se rovná práci sil vnitřních – princip virtuálních prací

$$\delta A = \delta U \quad (3.3)$$

Dosazením a srovnáním předchozích tří vztahů vyjde první Castiglianova věta.
Parciální derivací energie podle zobecněného posuvu se spočítá zobecněná síla.

$$Q_k = \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad (3.4)$$

Druhá Castiglianova věta:

$$q_k = \frac{\partial \tilde{U}}{\partial Q_k} \quad (3.5)$$

kde

\tilde{U} ...komplementární energie napjatosti

Při platnosti Hookova zákona platí i následující vztah:

$$\tilde{U} = U \quad (3.6)$$

Podmínka minima celkové komplementární energie

$$\delta W = 0 \quad (3.7)$$

kde

W ...práce potřebná pro návrat pružného tělesa do původního stavu při konstantním působení vnějších sil

Posuv v místě působení síly F .

$$w = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{1}{EJ} \int_l M(x) \cdot \frac{\partial M(x)}{\partial F} dx \quad (3.8)$$

Při výpočtu reakce, za posuv se dosadí nula i výraz se integruje.

$$\int_l M(x) \cdot \frac{\partial M(x)}{\partial F} dx = 0 \quad (3.9)$$

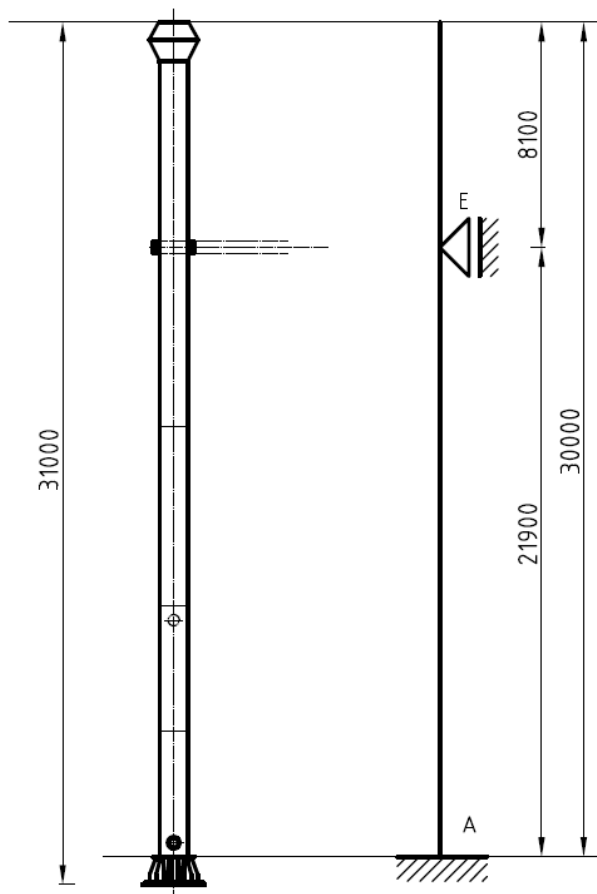
3.1 ÚPRAVY PŘED VÝPOČTEM

Základní geometrie byla zjednodušena a do analytického výpočtu byly uvažovány (viz Obrázek 2):

- vodící uložení – ve formě = kluzná kloubová podpora

Z výpočtu byly vynechány:

- dešťový kryt komínu (segment T_1 má stejný průřez až k vrcholku komínu)
- patka – je dostatečně tuhá, ve výpočtu je absolutně tuhá a je nahrazena vetknutím
- otvory (servisní a připojovací potrubí)



obr. 2 Zjednodušení modelu pro analytický výpočet

Geometrie:

- průřez se mění v pěti výškách T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 (blíže viz kapitola 3.1 obr. 5)
- patka komína se díky své konstrukci uvažuje v analytickém výpočtu jako absolutně tuhá a vetknutí se počítá až od jejího vrchu

Zátěžné stavy:

- vítr – působí kolmo na osu prutu jako spojitě zatížení s proměnnou hodnotou, parametry pro určení tlakové síly větru se určí podle normy ČSN EN 1991-1-4 [2]

Postup výpočtu tlakové síly větru

Komín se navrhuje pro průmyslovou oblast Karviná, pro kterou byly zjištěny tyto parametry:

- Za prvé musí být splněna podmínka minimální vzdálenosti komína od budovy z_g .

$$\frac{z_g}{b} > 1,5 \quad (3.10)$$

$$z_g > 1,5 \cdot b = 1,5 \cdot 0,75 = 1,125 \text{ [m]}$$

kde

b ...průměr komínu [m]

I. větrová oblast – kde je střední rychlost větru

$$v_{b,0} = 22,5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (3.11)$$

- hustota vzduchu

$$\rho_{vz} = 1,25 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \quad (3.12)$$

- součinitel směru větru

$$c_{dir} = 1 [-] \quad (3.13)$$

- součinitel ročního období

$$c_{season} = 1 [-] \quad (3.14)$$

- základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 22,5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (3.15)$$

- součinitel ortografie – pro sklon terénu do 5%

$$c_0 = 1 [-] \quad (3.16)$$

- součinitel turbulence

$$k_i = 1 [-] \quad (3.17)$$

IV. kategorie terénu – oblasti, ve kterých je min 15% povrchu pokryto budovami, jejichž průměrná výška je větší než 15m

- třecí výška

$$z_0 = 1 [\text{m}] \quad (3.18)$$

- výška konstantní rychlosti

$$z_{min} = 10 [\text{m}] \quad (3.19)$$

- součinitel terénu

$$k_r = 0,24 [\text{m}] \quad (3.20)$$

Výpočet maximálního dynamického tlaku q_p :

- součinitel drsnosti terénu

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,816 [-] \quad (3.21)$$

- střední rychlost větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 18,37 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.22)$$

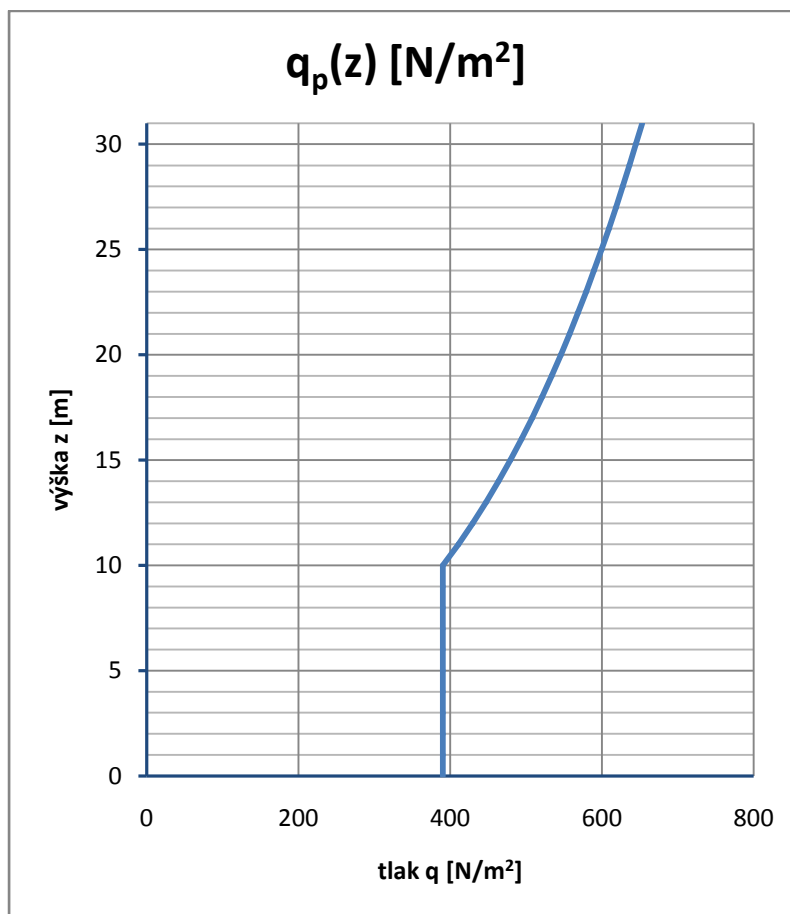
- intenzita turbulence

$$I_v(z) = \frac{(k_r \cdot v_b \cdot k_i)}{v_m(z)} = 0,294 [-] \quad (3.23)$$

- maximální dynamický tlak

$$q_p(z) = \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)]}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot v_m^2(z) [\text{N} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3.24)$$

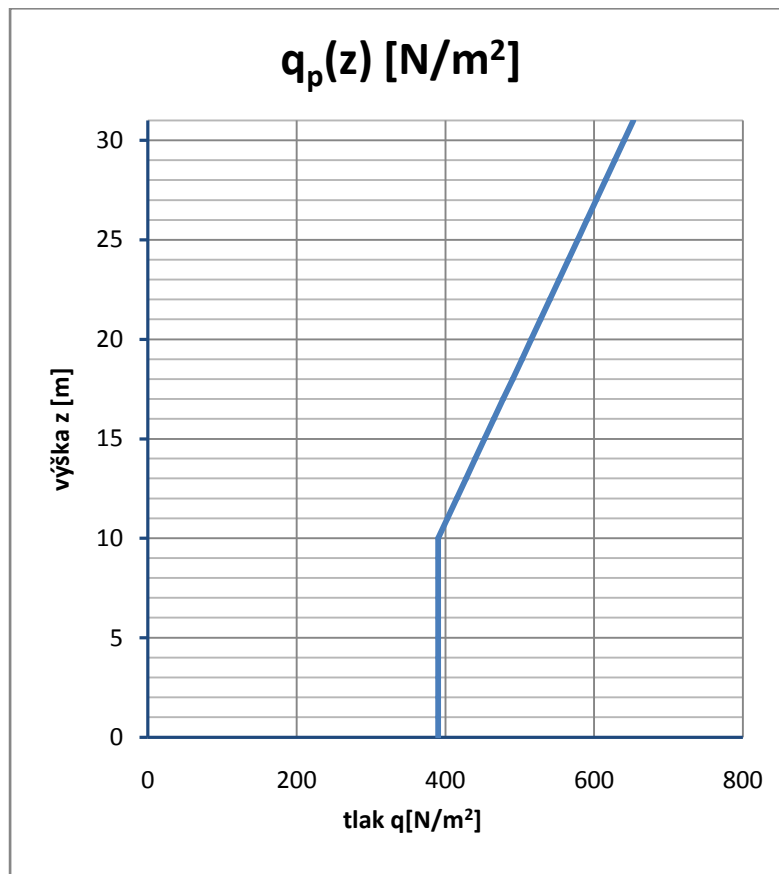
Závislost maximálního dynamického tlaku na výšce komína je zobrazen na následujícím obrázku 3.



obr. 3 Rozložení tlaku po výšce komína

Za účelem zjednodušení výpočtu byla část s nelineárním průběhem tlaku nahrazena průběhem lineárním (viz rovnice 3.24, obrázek 4). Průběh normového tlaku se totiž výrazně neliší od průběhu lineárního, takže tento krok jen zanedbatelně ovlivní výsledek. I z tohoto důvodu je v následujícím výpočtu zahrnut koeficient bezpečnosti.

$$q_p = 12,506z + 265,323 \quad (3.25)$$



obr. 4 Rozložení tlaku po výšce komína

Tlak do 10 m výšky je konstantní $q=390,38 \text{ N.m}^{-1}$, pak roste až na maximální hodnotu tlaku $q=653 \text{ N.m}^{-1}$ na vrcholu komína.

Aby bylo možné provést analytický výpočet, je nutné nejdřív přepočítat plošné zatížení q_p větrem na zatížení liniové q (rovnice 3.27). Vychází se z úvahy, že reakce při působení plošného zatížení se musí rovnat reakci od zatížení liniového.

$$R_p = R_q \text{ [N]} \quad (3.26)$$

$$p \cdot S = q \cdot l$$

$$q = \frac{p \cdot S}{l} = p \cdot D \text{ [N/m]}$$

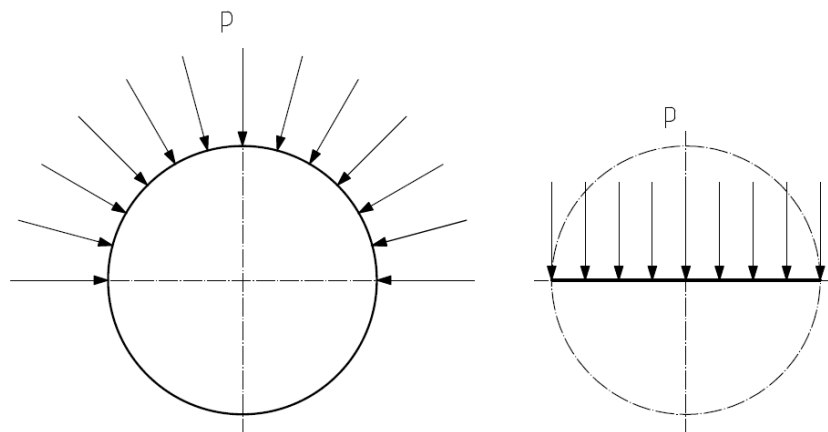
$$q = q_p \cdot D \text{ [N/m]} \quad (3.27)$$

kde

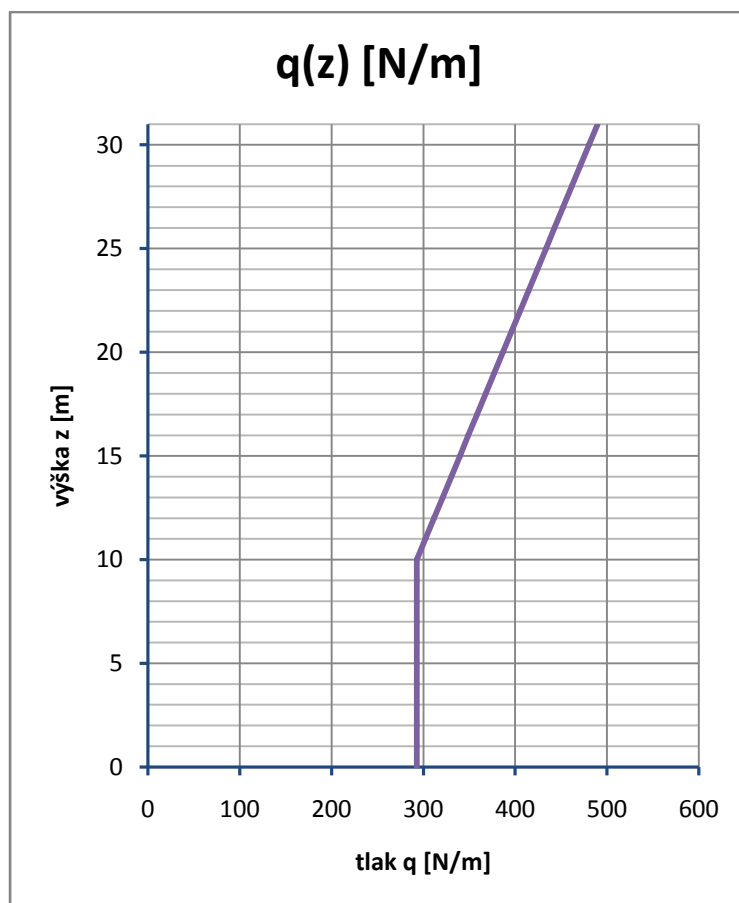
q_p ...maximální dynamický tlak [N/m^2]

D ...průměr komínu [m]

Důležitým předpokladem pro použitelnost předchozích vztahů je, že tlaková síla působící na půlku průřezu, má směr normály k ploše a je ekvivalentní k tlaku, působícím kolmo na rovinnou plochu, která vytíná skutečnou tlačnou plochu průřezu. Přehledné znázornění je na obrázku 5.



obr. 5 Ekvivalence tlaku



obr. 6 Spojité zatížení

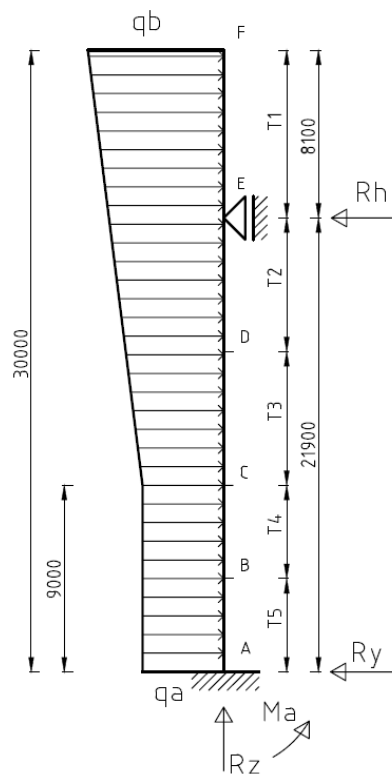
3.2 VÝPOČTOVÝ MODEL

Geometrie:

- průřez komína se mění v pěti výškách (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5) viz obr. 5

Geometrické okrajové podmínky, viz obr 5:

- nosník je na jednom konci dokonale vetknutý v bodě A
- uložení na posuvném kloubu v bodě E
- zatížení větrem je konstantní na úseku z bodu A do bodu C o hodnotě $q_a=292,79 \text{ N.m}^{-1}$, poté roste lineárně do bodu F na hodnotu $q_b=489,75 \text{ N.m}^{-1}$



obr. 7 Výpočtový model

Použitý materiál:

- Pro všechny části komína je použit stejný materiál ocel S235 (viz. tabulka 1)

Tabulka 1 Vlastnosti použité oceli

Nelegovaná jakostní konstrukční ocel			
Značení	S235JR	Hodnota	Jednotka
Mechanické vlastnosti	mez kluzu R_e	235	MPa
	Snížená mez (k_s)	235 / 1,5	MPa
	mez pevnosti R_m	>360	MPa
	modul pružnosti E	210 000	MPa
	Poissonovo číslo μ	0,3	-
	hustota	7850	kg/m ³
Chemické složení	C	<0,22	%
	Mn	<1,6	%
	P	<0,05	%
	S	<0,05	%
	Si	<0,05	%

3.3 POSTUP VÝPOČTU

1. Z rovnováhy sil a pomocí Castiglianovy věty určit reakce.
2. Stanovit průběh ohybového momentu.
3. Navrhnout tloušťky plechů pro jednotlivé části komína.
4. Stanovit průběh ohybového napětí.
5. Stanoví se dovolené napětí (mez kluzu navržené oceli se vydělí koeficientem bezpečnosti $k_s=1,5$).
6. Podle průběhu napětí posoudit kvalitu odhadu návrhu tlouštěk plechů. Pokud návrh nevyhoví, tedy je překročeno dovolené napětí, navrhnout optimalizované tloušťky plechů. Opakovat tak dlouho dokud není nalezena vhodná kombinace tlouštěk plechů.

3.4 VÝPOČET

Za prvé je nutné provést geometrický rozbor spojitého zatížení, které se mění s výškou (dále jen vzdálenost x , která se měří od vrchu komína). Následující výpočet se provádí pro každý z pěti segmentů (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5), i když to pro počáteční výpočet reakcí není nutné. Při výpočtu napětí, kde už průběh závisí na tloušťkách plechů, můžeme použít vztahy pro výpočet momentů z rovnic (3.33)

Velikost závislé proměnné q_x na vzdálenosti x se určí z podobnosti trojúhelníka:

$$\frac{q_b - q_a}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{q_b - q_x}{x} \quad (3.28)$$

Dále vyjádřené dílčí tlaky na jednotlivých segmentech:

- výpočet q_x na průřezu T_1 (viz obr.6 vlevo)

$$q_x = q_b - x_1 \cdot \frac{q_b - q_a}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (3.29)$$

- výpočet q_x na segmentu T_2 (viz obr.6 uprostřed)

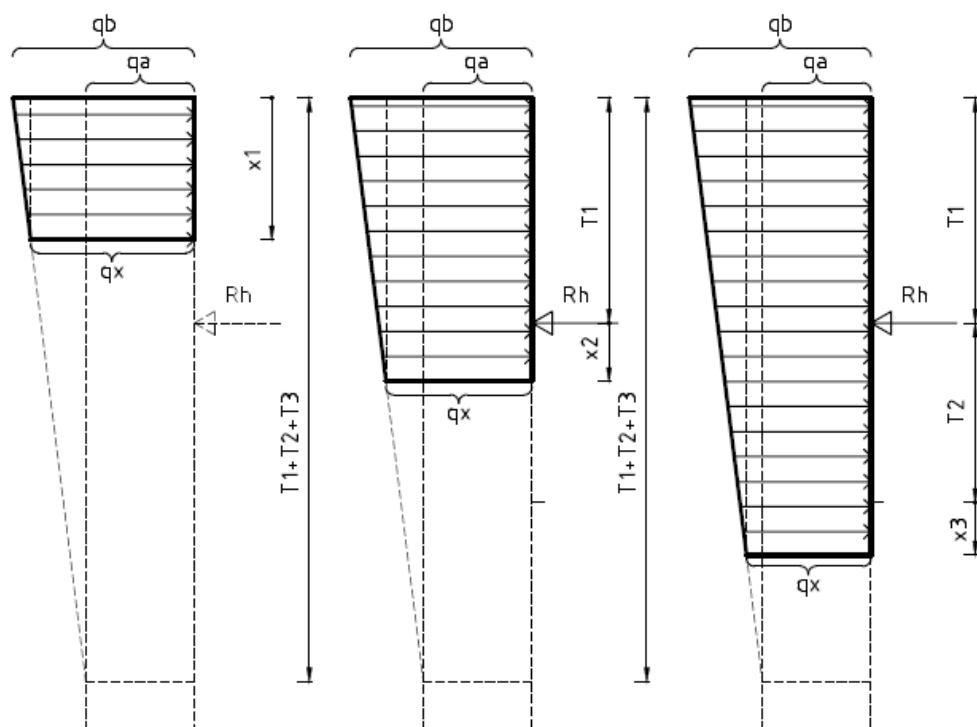
$$q_x = q_b - (x_2 + t_1) \cdot \frac{q_b - q_a}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (3.30)$$

- výpočet q_x na segmentu T_3 (viz obr.6 vpravo)

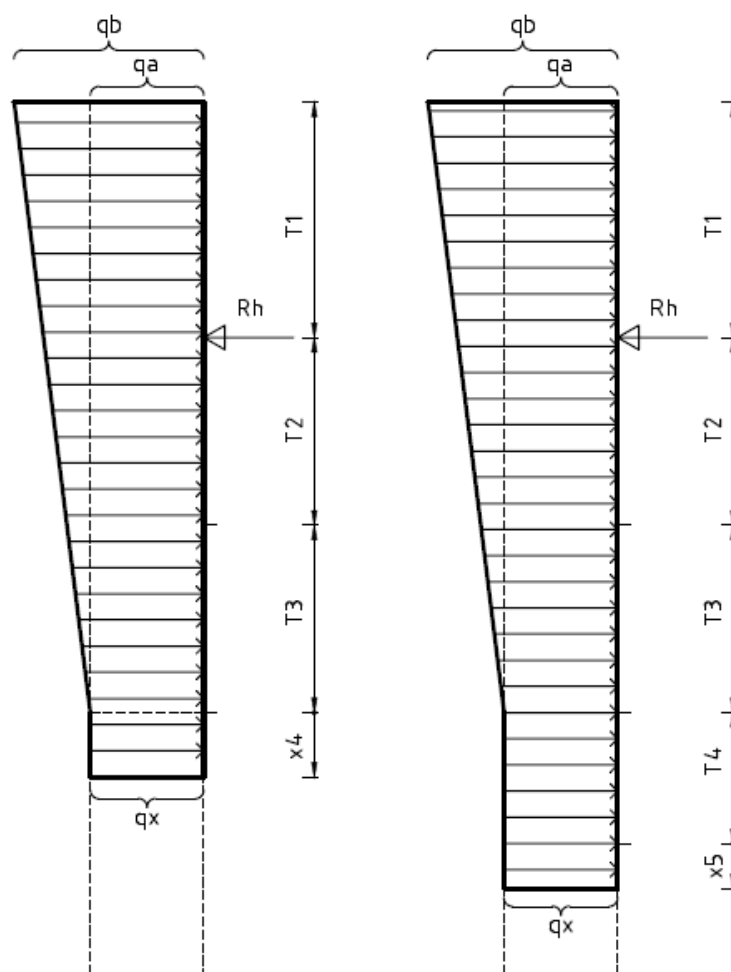
$$q_x = q_b - (x_3 + t_1 + t_2) \cdot \frac{q_b - q_a}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (3.31)$$

- q_x na segmentech T_4 a T_5 (viz obr.7)

$$q_x = q_a \quad (3.32)$$



obr. 8 Výpočet ohybového momentu shora ve vzdálenosti x_1 , x_2 , x_3 (zleva)



obr. 9 Výpočet momentu shora pro ve vzdálenosti x_4 , x_5 (zleva)

Délky jednotlivých úseků:

$$T_1 = 8\,100 \text{ [mm]}$$

$$T_2 = 6\,450 \text{ [mm]}$$

$$T_3 = 6\,450 \text{ [mm]}$$

$$T_4 = 4\,500 \text{ [mm]}$$

$$T_5 = 4\,500 \text{ [mm]}$$

Jelikož řešená úloha je 1x staticky neurčitá, bylo nutné vypočítat neznámé reakce podle Castiglianovy věty. V tomto případě se podle této věty spočítala reakce v horizontálním směru působící v posuvném uložení. Jednotlivé části výpočtu pro všechny segmenty se sečetli a položily rovny nule.

$$\int_0^T M(x) \cdot \frac{\partial M(x)}{\partial R_h} dx = 0 \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_1} \left[\frac{- \left[q_b - x_1 \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot x_1^2}{2} - \frac{\left[q_b - \left[q_b - x_1 \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot x_1^2 \cdot 2}{2 \cdot 3} \right] \cdot 0 \cdot dx_1 \\ & + \\ & \int_0^{t_2} \left[R_h \cdot x_2 - \frac{\left[q_b - (x_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot (x_2 + T_1)^2}{2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{\left[q_b - \left[q_b - (x_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot (x_2 + T_1)^2 \cdot 2}{2 \cdot 3} \right] \cdot x_2 \cdot dx_2 \\ & + \\ & \int_0^{t_3} \left[R_h \cdot (x_3 + T_2) - \frac{\left[q_b - (x_3 + T_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot (x_3 + T_2 + T_1)^2}{2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{\left[q_b - \left[q_b - (x_3 + T_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot (x_3 + T_2 + T_1)^2 \cdot 2}{2 \cdot 3} \right] \cdot (x_3 + T_2) \\ & \quad \cdot dx_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \\
& \int_0^{t_4} \left[R_h \cdot (x_3 + T_2 + T_3) - \frac{q_a \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + x_4)^2}{2} - \frac{(q_b - q_a) \cdot (T_1 + T_2 + T_3)}{2} \right. \\
& \quad \left. \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + x_4 \right] \right] \cdot (x_4 + T_2 + T_3) \cdot dx_4 \\
& + \\
& \int_0^{t_5} \left[R_h \cdot (x_3 + T_2 + T_3 + T_4) - \frac{q_a \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + x_5)^2}{2} \right. \\
& \quad \left. - \frac{(q_b - q_a) \cdot (T_1 + T_2 + T_3)}{2} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + T_4 + x_5 \right] \right] \\
& \quad \cdot (x_5 + T_2 + T_3 + T_4) \cdot x_5 = 0
\end{aligned}$$

– výsledná hodnota reakce je

$$R_h = 7\,666 \text{ [N]} \quad (3.34)$$

Výpočet vodorovné reakce ve vetknutí (statická rovnice rovnováhy ve směru y)

$$R_y + R_h - \left[q_a \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5) + \frac{(q_b - q_a) \cdot (T_1 + T_2 + T_3)}{2} \right] = 0$$

$$R_y = 3\,185,78 \text{ [N]} \quad (3.35)$$

Momenty byly stanoveny dosazením vzdálenosti x do následujících vztahů. Průběh byl pak vykreslen do grafu.

$$\begin{aligned}
M_O(x_1) &= \frac{- \left[q_b - x_1 \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot x_1^2}{2} - \frac{\left[q_b - \left[q_b - x_1 \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot x_1^2 \cdot 2}{2 \cdot 3} \\
M_O(x_2) &= R_h \cdot x_2 - \frac{\left[q_b - (x_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot (x_2 + T_1)^2}{2} \\
&\quad - \frac{\left[q_b - \left[q_b - (x_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot (x_2 + T_1)^2 \cdot 2}{2 \cdot 3}
\end{aligned}$$

$$M_O(x_3) = R_h \cdot (x_3 + T_2) - \frac{\left[q_b - (x_3 + T_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \cdot (x_3 + T_2 + T_1)^2}{2}$$

$$- \frac{\left[q_b - \left[q_b - (x_3 + T_2 + T_1) \cdot \frac{(q_b - q_a)}{T_1 + T_2 + T_3} \right] \right] \cdot (x_3 + T_2 + T_1)^2 \cdot 2}{2 \cdot 3}$$

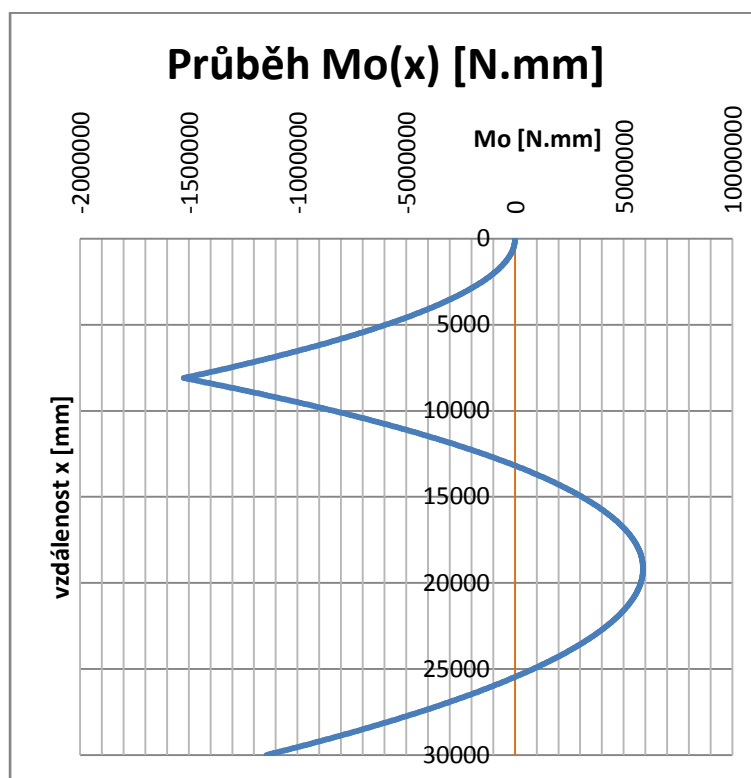
$$M_O(x_4) = R_h \cdot (x_3 + T_2 + T_3) - \frac{q_a \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + x_4)^2}{2} - \frac{(q_b - q_a) \cdot (T_1 + T_2 + T_3)}{2}$$

$$\cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + x_4 \right]$$

$$M_O(x_5) = R_h \cdot (x_3 + T_2 + T_3 + T_4) - \frac{q_a \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + x_5)^2}{2}$$

$$- \frac{(q_b - q_a) \cdot (T_1 + T_2 + T_3)}{2} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot (T_1 + T_2 + T_3) + T_4 + x_5 \right]$$

Tyto momenty se počítaly s určitým krokem, v tomto případě po 50 mm a z výsledných hodnot byl vykreslen průběh ohybového momentu po celé výšce nosníku (viz obr. 10). Pro tyto numerické výpočty bylo užito PC software. Maximální moment vychází v posuvném uložení $M_{Omax} = -15235513$ Nmm. Další lokální maximum $M_{O2} = 5885890$ Nmm je na segmentu T_3 ve vzdálenosti $x = 19\,150$ mm a poslední lokální maximum je ve vetknutí $M_{O3} = -11435940$ Nmm.



obr. 10 Průběh ohybového momentu

Dalším krokem je návrh tloušťek plechů a stanovení průběhu napětí. K tomu je potřeba stanovit geometrické charakteristiky průřezu.

- Výpočet modulu průřezu v ohybu pro mezikruží.

$$W_o = \frac{J}{e} = \frac{\frac{\pi}{64} \cdot (d_1^4 - d_2^4)}{\frac{d_1}{2}} = \frac{\pi \cdot (d_1^4 - d_2^4)}{32 \cdot d_1} [\text{mm}^3] \quad (3.36)$$

kde

J ...kvadratický moment setrvačnosti

e ...vzdálenost krajního vlákna od středu

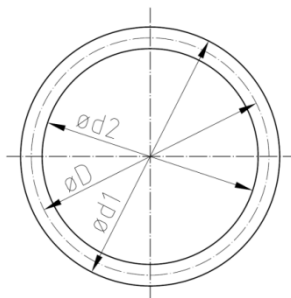
rozměry průřezu:

$$d_1 = D + t [\text{mm}] \quad (3.37)$$

$$d_2 = D - t [\text{mm}] \quad (3.38)$$

kde

D ...průměr střednice plechu komína, a to 750 mm



obr. 11 Průřez komínu

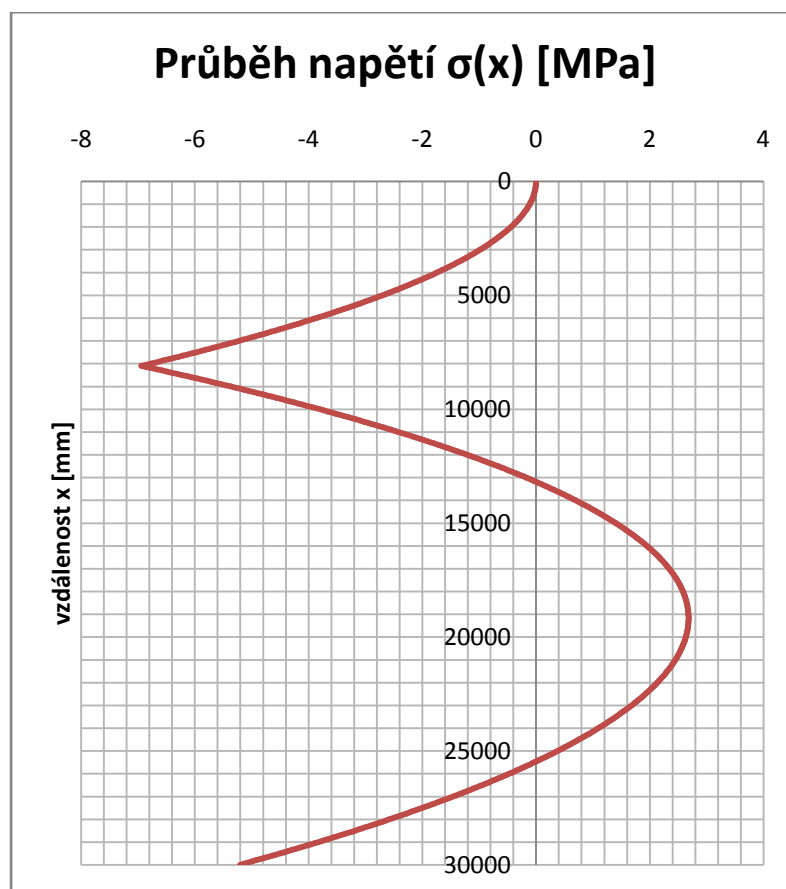
- návrh tloušťek plechů a výpočet geometrických charakteristik

Tabulka 2 Geometrické charakteristiky

Tloušťka [mm]		Průměry [mm]		Moment setrvačnosti [mm ²]		Modul průřezu [mm ³]	
T1	5	d1	755	Jt1	828386441	Wo1	2194401
		d2	745				
T2	5	d1	755	Jt2	828386441	Wo2	2194401
		d2	745				
T3	5	d1	755	Jt3	828386441	Wo3	2194401
		d2	745				
T4	5	d1	755	Jt4	828386441	Wo4	2194401
		d2	745				
T5	5	d1	755	Jt5	828386441	Wo5	2194401
		d2	745				

– ohybové napětí

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} [\text{MPa}] \quad (3.39)$$



obr. 12 Průběh ohybového napětí

Musí být splněna následující podmínka (3.40), kdy maximální napětí nesmí přesáhnout napětí dovolené.

$$\sigma_{max} < \sigma_D = \frac{R_e}{k_s} = \frac{235}{1,5} \quad (3.40)$$

Výsledné maximální napětí je na předělu dvou segmentů T_I a T_{II} , viz obr. 12.

$$\sigma_{max} = 6,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_D = 156,7 \text{ MPa}$$

$$6,94 < 156$$

Pro zvolenou tloušťku plechu 5 mm je na předchozím grafu vidět, že všechna lokální maxima napětí jsou o dva řády menší, než je napětí dovolené.

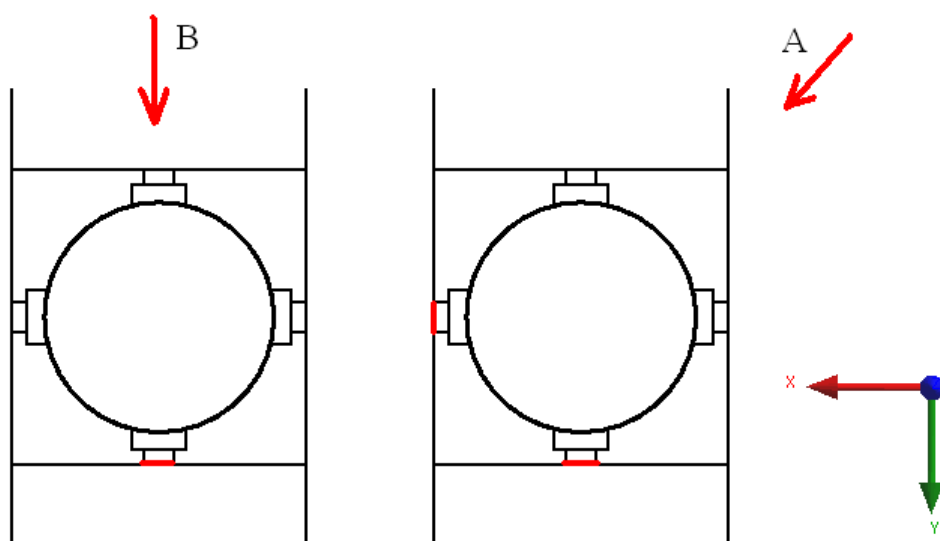
3.5 ZÍSKANÉ ŘEŠENÍ

Vzhledem k výšce komínu, jeho posuvnému uložení a velikosti tlaku větru se dalo očekávat, že v konstrukci komínu nebudou působit extrémní síly, které by nutily volit pro komín velké tloušťky plechů. Z analytického výpočtu tedy vyplývá, že 5 mm je dostatečná tloušťka plechu. Zde maximální napětí dosáhne jen zlomku napětí dovoleného. Tato tloušťka byla volena jako nejmenší, jelikož výroba menších tloušťek plechů není pro tento materiál běžná a taktéž se počítá s přídavky na korozi.

4 ŘEŠENÍ TECHNICKÉHO PROBLÉMU – PEVNOSTNÍ VÝPOČET POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

Výpočet pomocí MKP zohledňuje celkové zatížení skutečného komínu a vychází z návrhového analytického výpočtu.

Pro výpočet pomocí metody konečných prvků bylo nutné vytvořit geometrický model v software Autodesk Inventor 2012a ten následně upravit pro výpočet. Geometriepak byla převedena do výpočetního software Ansys Workbench 13.0. Poté byla na modelu vytvořena konečno-prvková síť a zadány okrajové podmínky. Při zatěžování větrem byl uvažován směr větru *B* (viz obr. 13) jeho působení, kde se daly očekávat největší napětí na konstrukci vzhledem ke geometrii vodícího uložení v rámu (viz kapitola 4.5). Je předpoklad, že zatížení v obecném směru *A* způsobí opření komínu ve dvou bodech rámu, a tudíž rozložení celkového napětí do dvou míst. Směr *B* je horší, jelikož komín je při zatížení opřen jen o jeden člen vodícího uložení.



obr. 13 Směry větru a jejich vliv na konstrukci

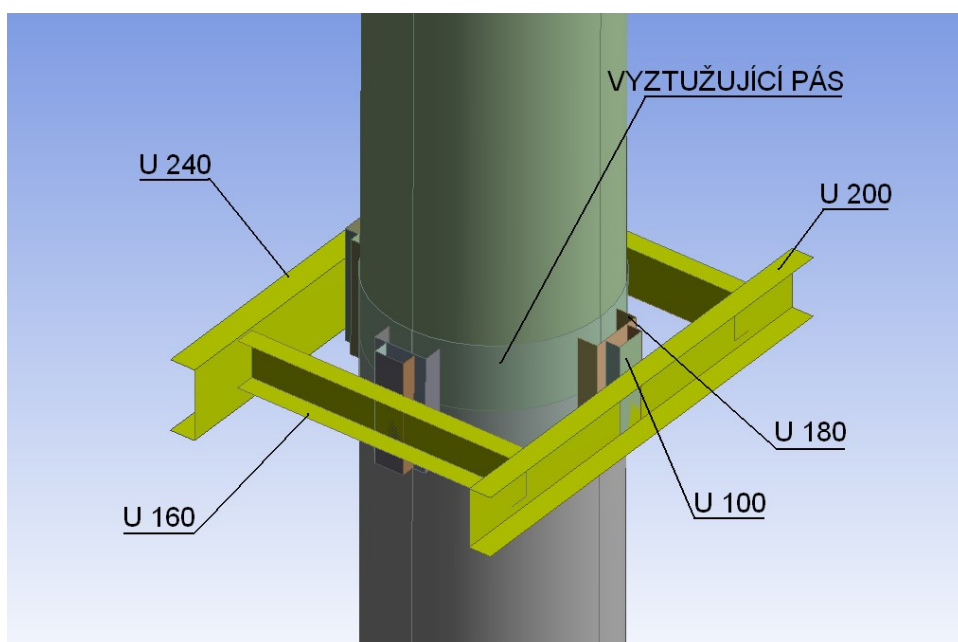
4.1 GEOMETRICKÝ MODEL

V software Inventor 2012 byly provedeny zjednodušující úpravy:

- dešťová ochrana je zaslepena (navýšení hmotnosti zohledňující svary a výztuhy)
- nebyly modelovány svarové housenky

- servisní otvor modelován bez šroubů a příruby, zůstala jen krátká trubka vycházející z tělesa komína
- byl navržen vyztužující pás tloušťky 5 mm v oblasti posuvného uložení pod příruby U profilů

V software Inventor 2012 byly všechny části modelu vytvořeny pomocí skořepinových prvků, u nichž se v případě potřeby dají jednoduše změnit jejich tloušťky. Základní rozměry se vztahovaly ke střednicím skořepin. Jako skořepinové prvky byly vytvořeny všechny plechy, jak samotného komína, tak plechy patky. Taktéž pomocí skořepiny byly vytvořeny profily tvaru U vodícího uložení.



obr. 14 Detail vodícího uložení (světle je zobrazen rám)

4.2 MATERIÁLOVÝ MODEL

Materiálový model představuje ocel S325JR (viz tabulka 3)

Parametry:

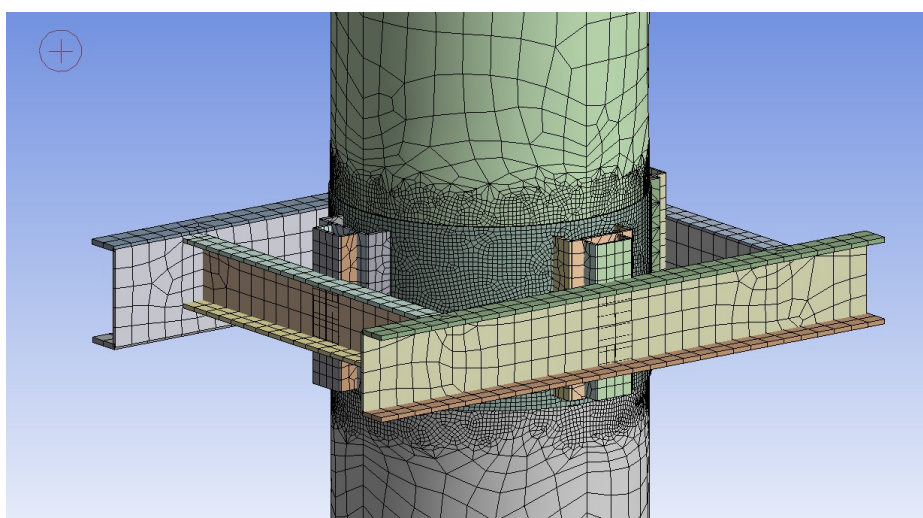
- oblast malých deformací – platnost Hookova zákona
- homogenní izotropní materiál
- koeficient bezpečnosti $k_s=1,5$

Tabulka 3 Vlastnosti použité oceli

Nelegovaná jakostní konstrukční ocel			
Značení	S235JR	Hodnota	Jednotka
Mechanické vlastnosti	mez kluzu R_e	235	MPa
	Snížená mez (k_s)	235 / 1,5	MPa
	mez pevnosti R_m	>360	MPa
	modul pružnosti E	210 000	MPa
	Poissonovo číslo μ	0,3	-
	hustota	7850	kg/m ³
Chemické složení	C	<0,22	%
	Mn	<1,6	%
	P	<0,05	%
	S	<0,05	%
	Si	<0,05	%

4.3 DISKRETIZACE GEOMETRICKÉHO MODELU – SÍŤOVÁNÍ

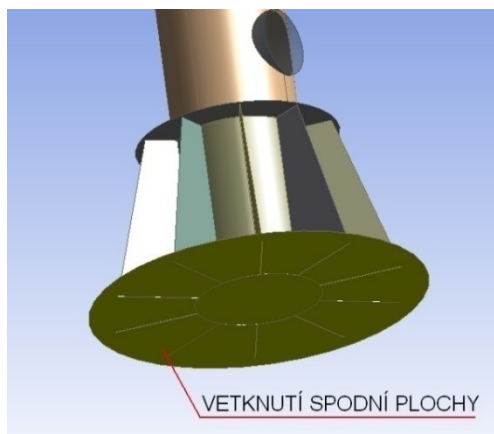
Pro kvalitní výpočet je důležité vytvořit i kvalitní konečno-prvkovou síť. Jelikož celý geometrický model je tvořen skořepinovými prvky, bylo s výhodou přistoupeno k diskretizaci pomocí skořepinových prvků. V určitých místech byly provedeny korektury (zjemnění) sítě v oblastech zájmu, tzn. tam, kde se předpokládá vysoké napětí. Zahuštění sítě bylo provedeno v oblasti posuvného uložení (viz obr. 15), na tubusu komína, kde také podle předběžné analytického výpočtu je největší ohybový moment a také nejvyšší ohybové napětí. V tomto místě jsou také ostré přechody mezi skořepinovými prvky, a právě v těchto místech by mělo vzniknout vysoké napětí.



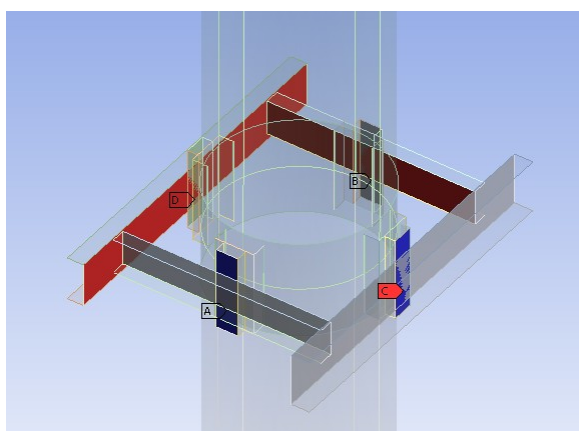
obr. 15 Detail sítě u posuvného uložení

4.4 KINEMATICKÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

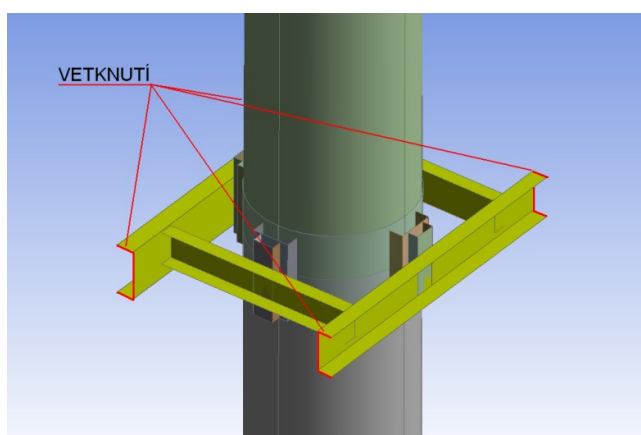
- vetknutí patky – odebrání všech stupňů volnosti na dolní ploše patky. Dolní plocha je uložena na betonovém základě a pevně připevněna šrouby. Viz obr. 16
- vedení – kontaktní spojení (dotyk bez tření) mezi U profil a vodící člen (svařenec rámu) viz obr. 17
- rám vodícího členu vetknut (odebrání všech stupňů volnosti na hranách průřezu) ve všech jeho čtyřech koncích viz obr. 18



obr. 16 Vetknutí patky komínu



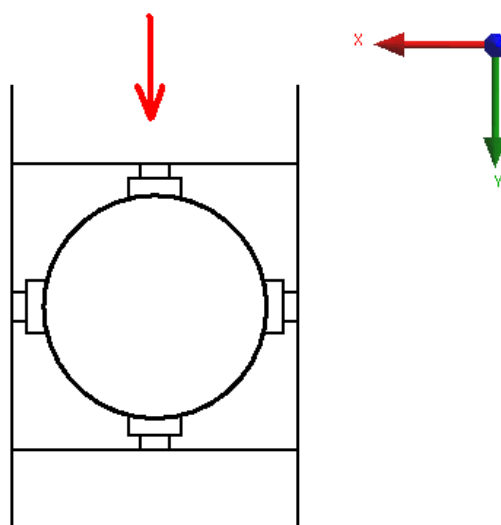
obr. 17 Kontaktní plochy



obr. 18 Vetknutí rámu

4.5 SILOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

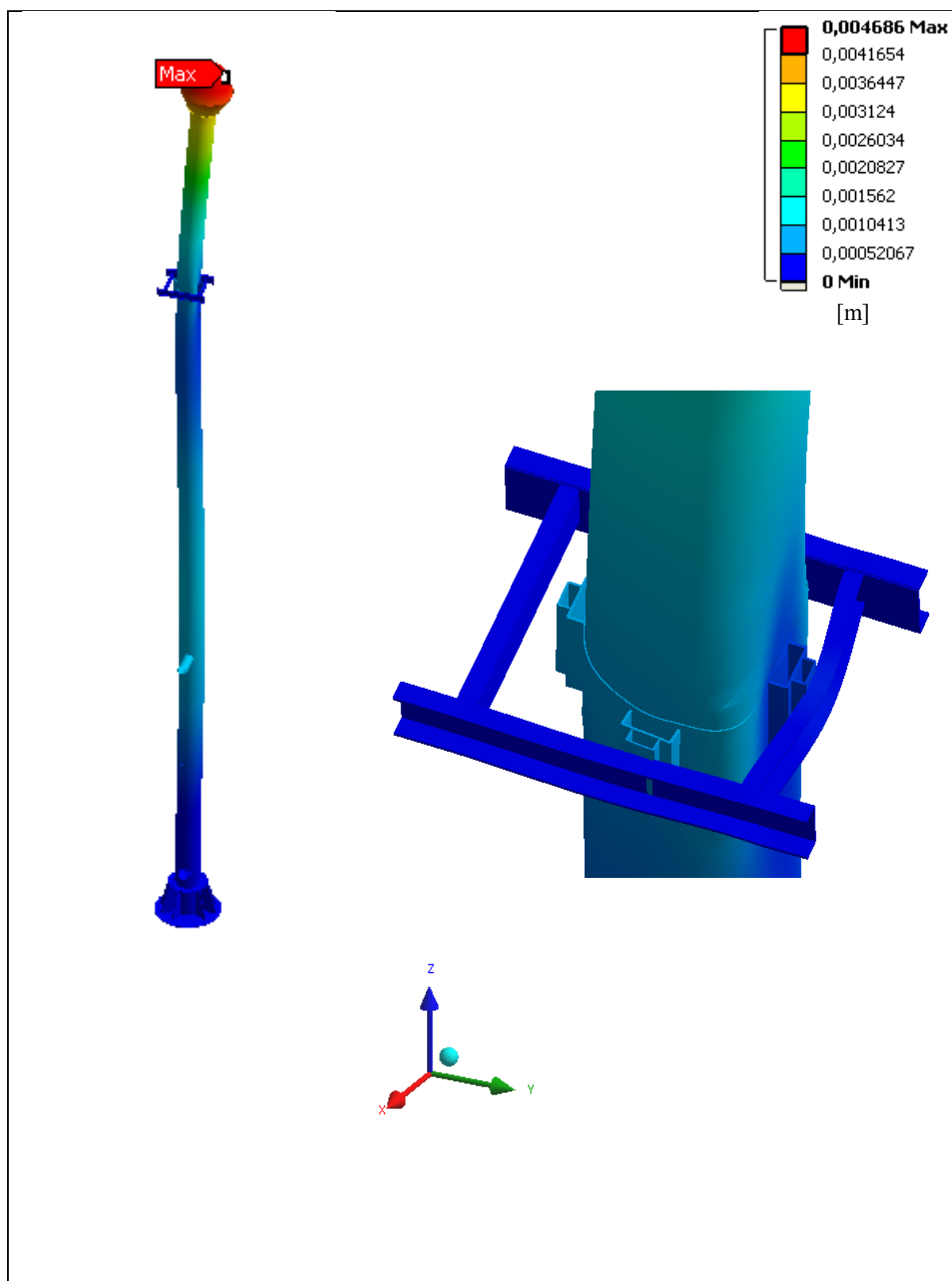
- vlastní tíha při působení gravitačního zrychlení $g=9,81 \text{ m/s}^2$ v ose $-Z$
- zatížení větrem bylo simulováno dle ČSN EN 1991-1-4^[2] (viz. kapitola 3) v podobě tlaku na plochu. Tlak byl zadán na polovinu průřezu působící v normále ploch (viz. obr.5, kapitola 3). Tlak byl v tomto případě zadán pouze na tubus komínu, hlavu komínu a přívodní potrubí. Po výšce komínu je průběh tlaku proměnlivý, průběh byl stanoven již kapitole 3. Směr větru je tedy uvažován ve směru osy Y prezentovaném na obrázku 19.



obr. 19 Směr větru (při pohledu shora)

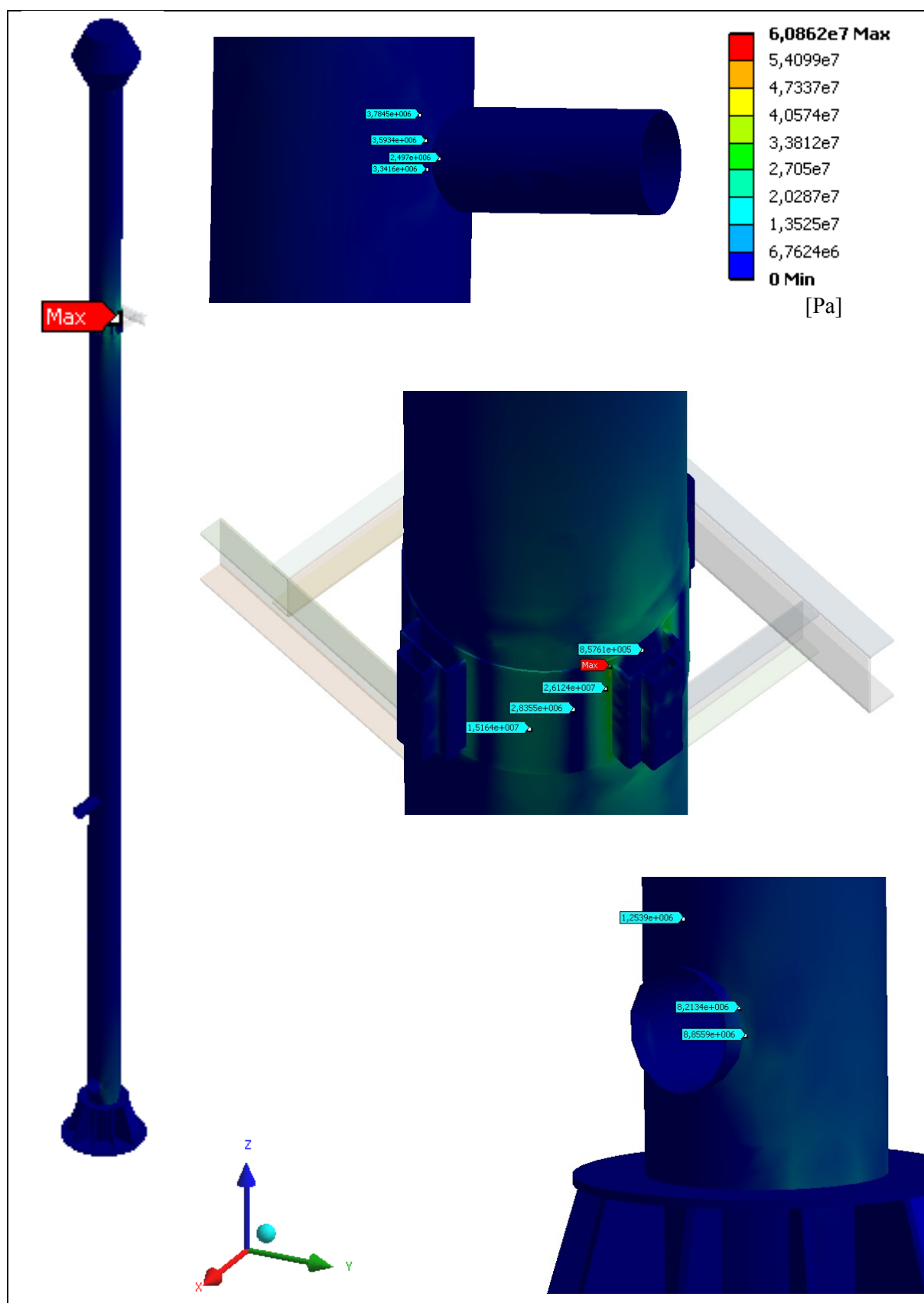
4.6 ZÍSKANÁ ŘEŠENÍ

Největší napětí vznikla v rámové konstrukci vodícího uložení. Avšak rám se v této práci neřeší. Důležitá jsou napětí na samotném plášti komínu, což bylo cílem tohoto úsilí. Přesto podle charakteru zatížení a tvaru konstrukce byla napětí nejvyšší právě v blízkosti vodícího členu. Výsledné hodnoty jsou tedy přehledně vypsány a vykresleny na následujících stránkách, kde už jsou zanedbány hodnoty na rámové konstrukci. Byly spočítány hodnoty redukovaného napětí podle energetické hypotézy HMM v posuvném uložení na styku U profilu s komínem, výsledkem je hodnota $\sigma=60,86 \text{ MPa}$, dále pak hodnoty hlavních napětí a hodnoty normálových napětí ve třech osách zvoleného souřadného systému modelu komínu. Maximální posuv v obecném vektoru vychází na vrcholku komína, a to $u=4,7 \text{ mm}$. Výsledná napětí a posuvy jsou graficky vyobrazena na následujících listech (viz obrázky 20÷27).



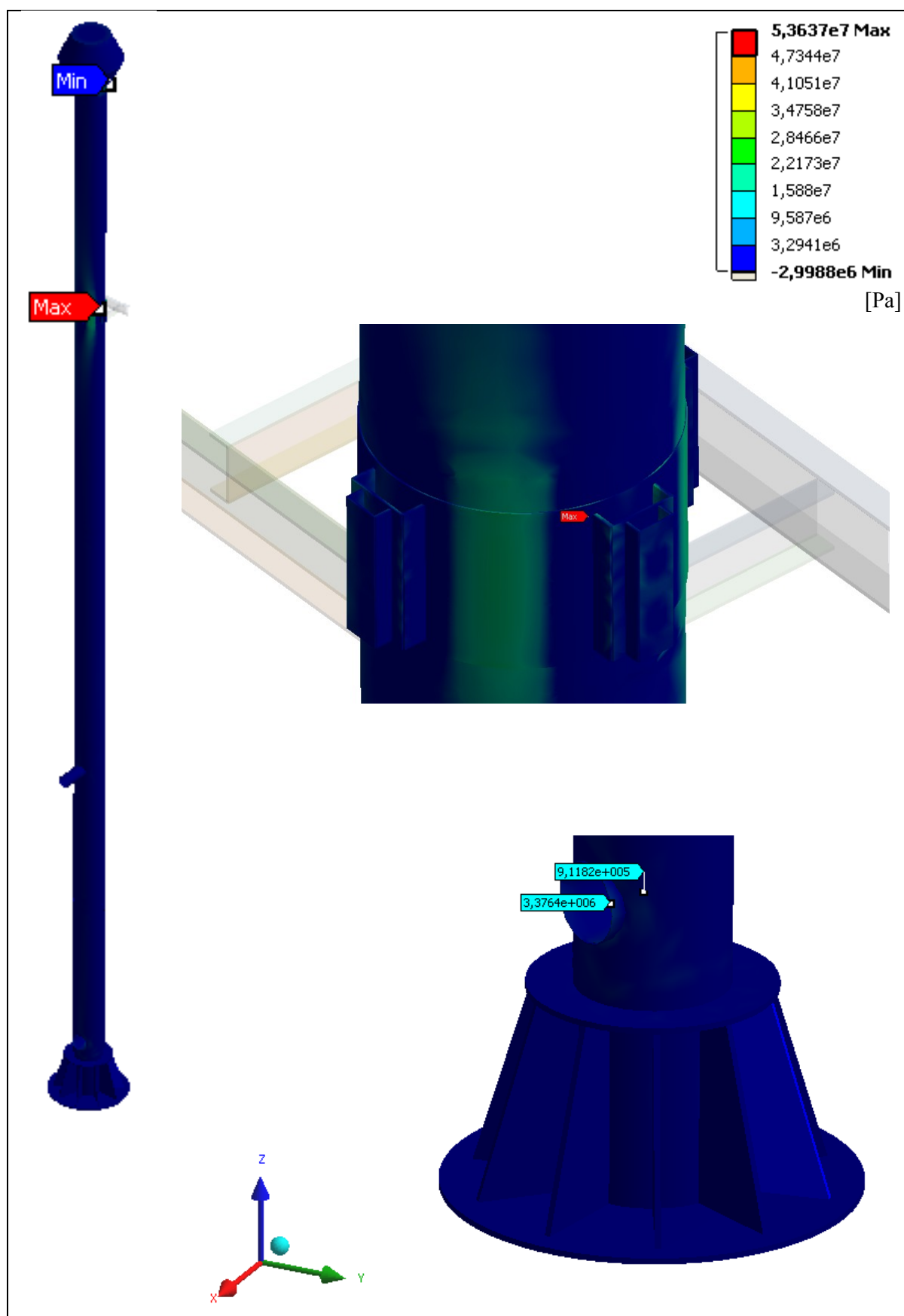
obr. 20 Výsledné posuvy (celkový pohled+detail)

Maximální posuv $u=4,7$ [mm]



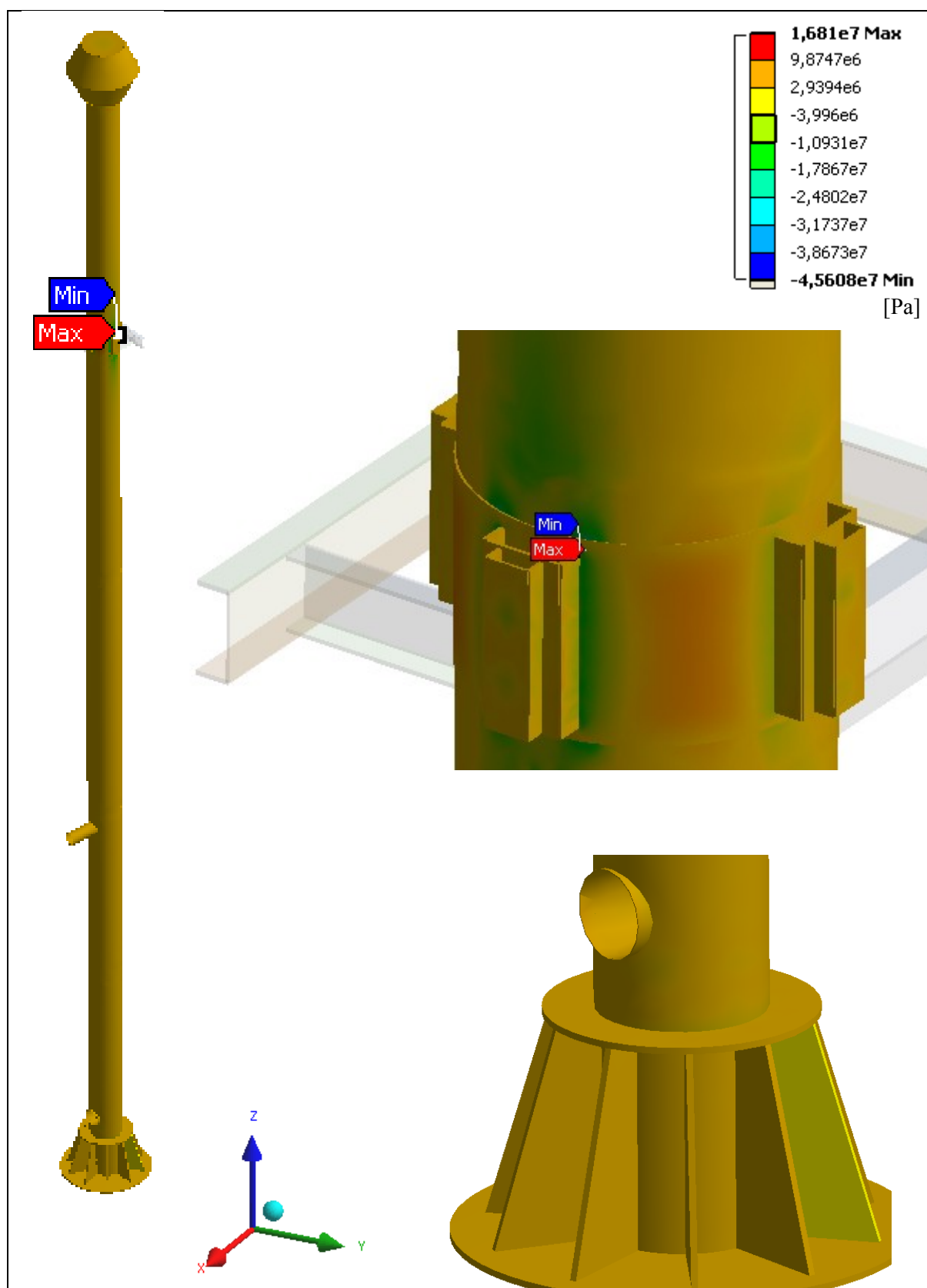
obr. 21 Maximální redukované napětí dle HMM (celkový pohled+details)

Maximální redukované napětí dle HMM $\sigma=60,86[\text{MPa}]$



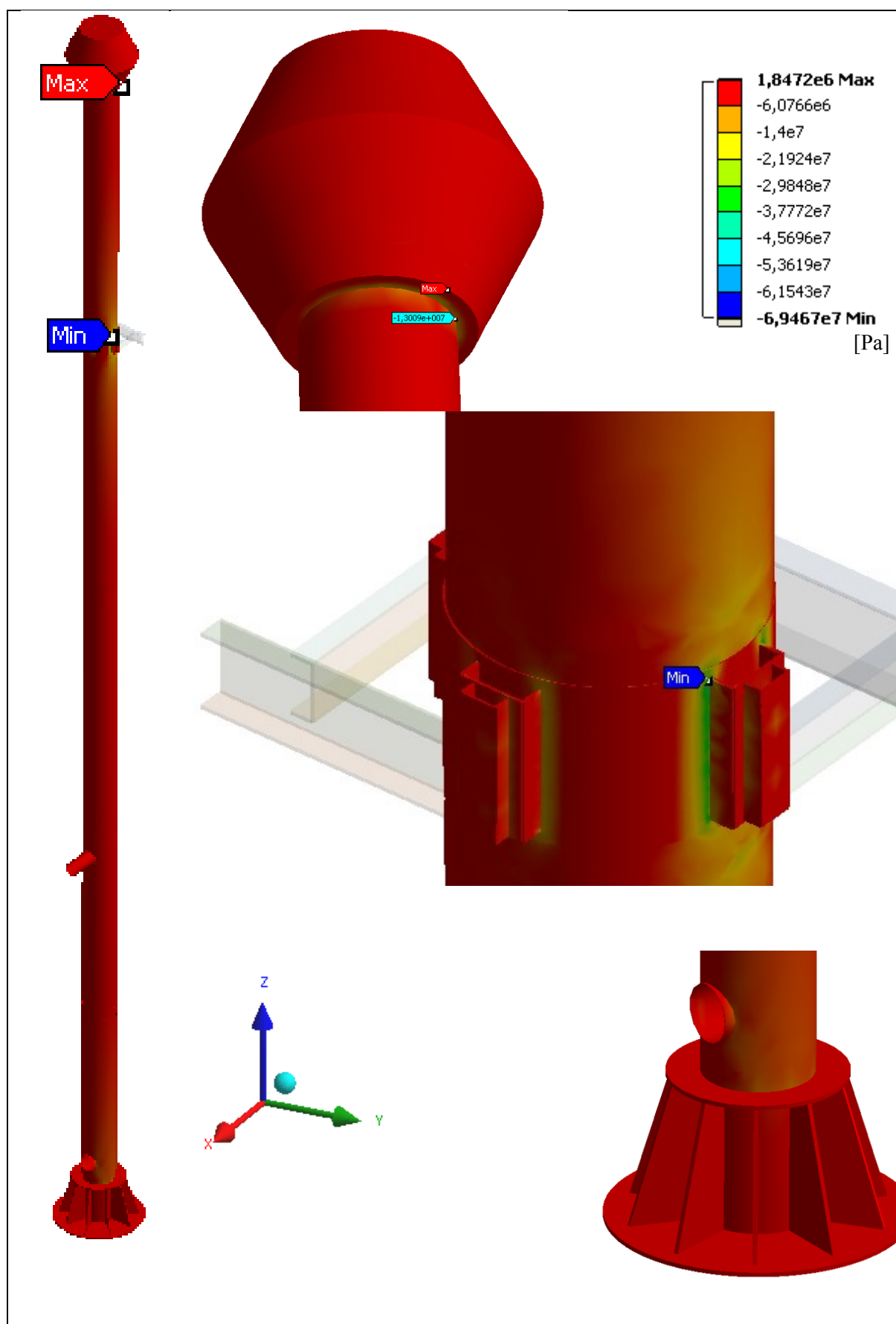
obr. 22 První hlavní napětí (celkový pohled+detaily)

První hlavní napětí $\sigma_{\max}=53,64[\text{MPa}]$, $\sigma_{\min}=-3,00[\text{MPa}]$.



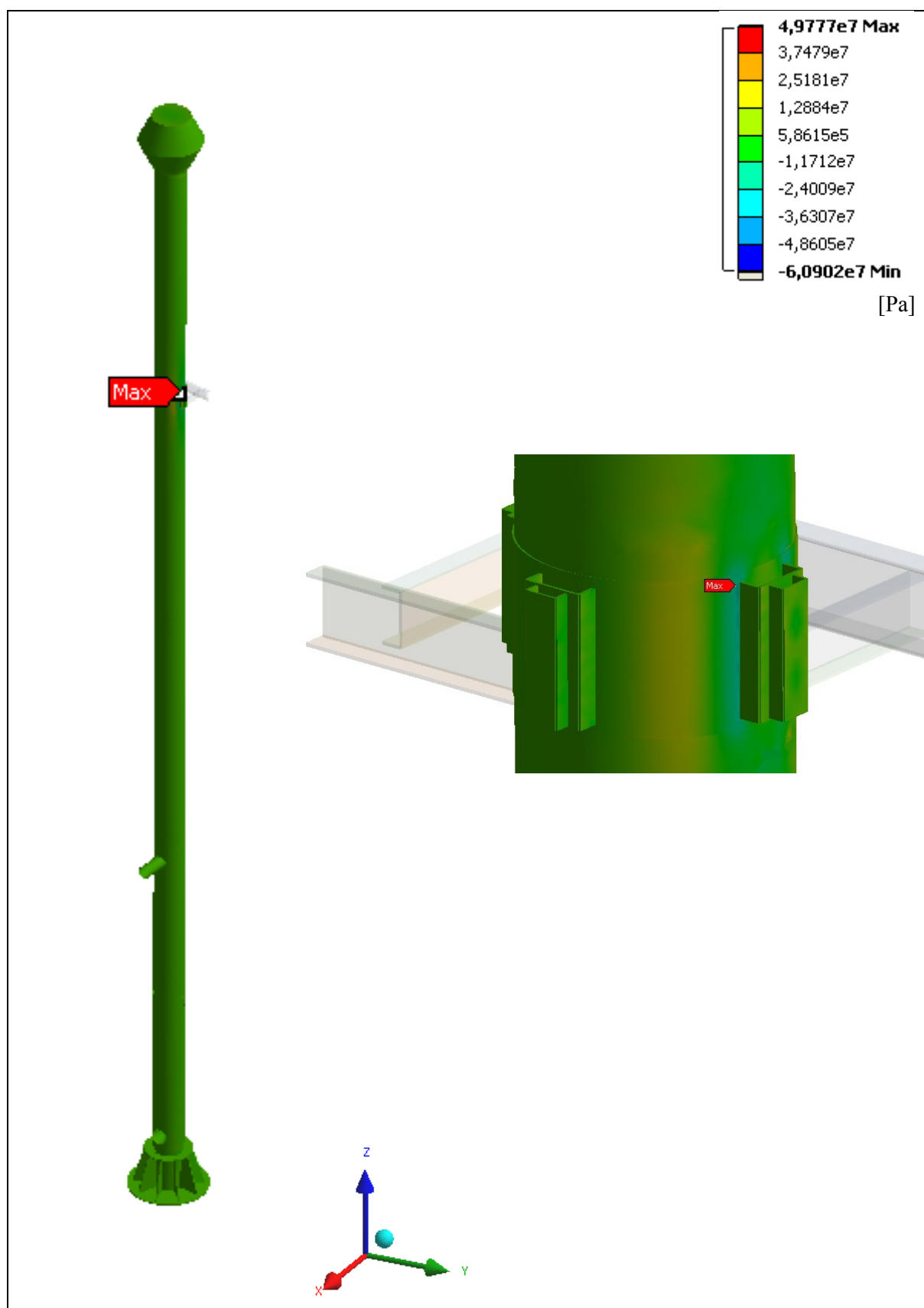
obr. 23 Druhé hlavní napětí (celkový pohled+detaily)

Druhé hlavní napětí $\sigma_{\max}=16,8[\text{MPa}]$, $\sigma_{\min}=-45,6[\text{MPa}]$.



obr. 24 Třetí hlavní napětí (celkový pohled+detaily)

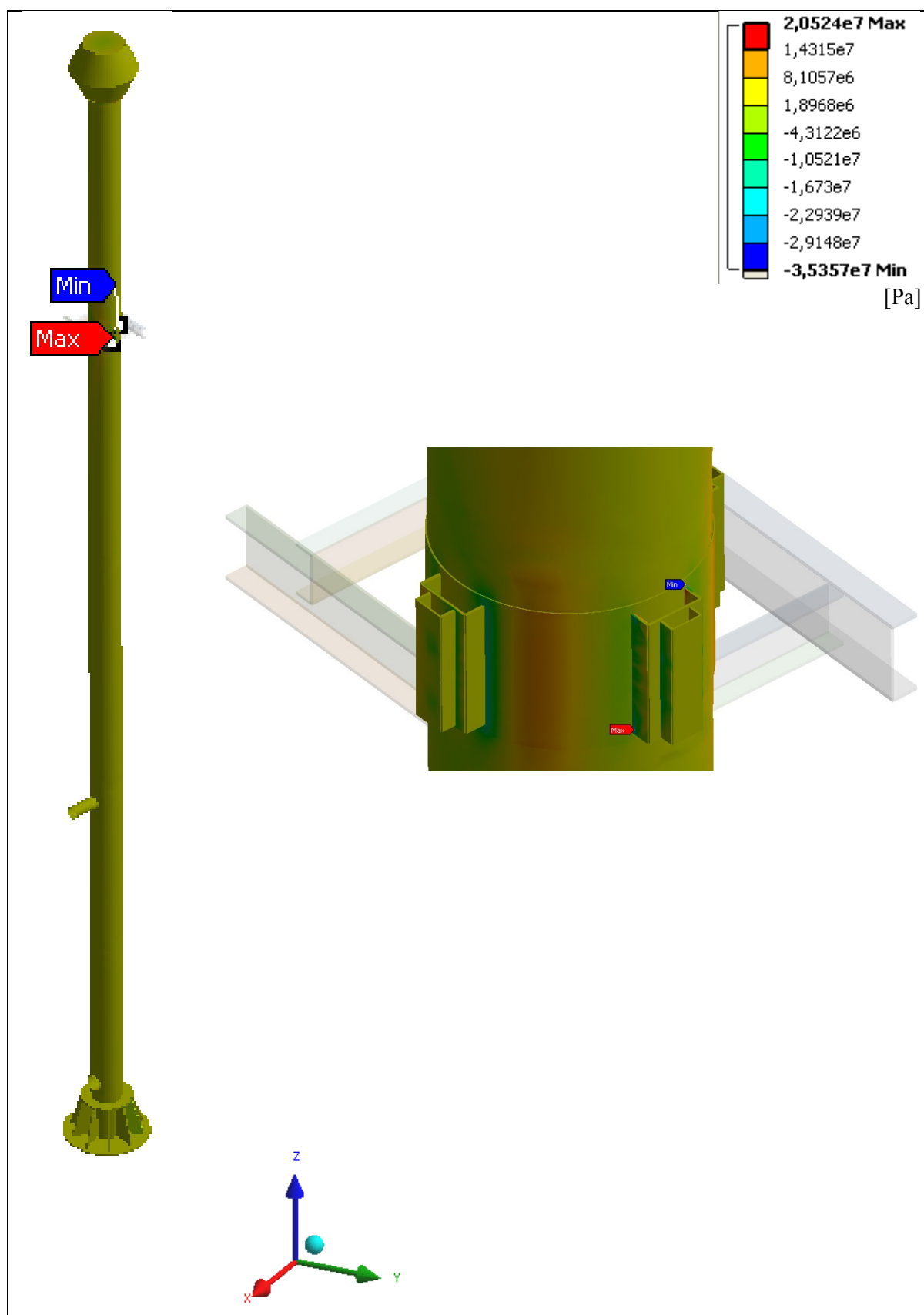
Třetí hlavní napětí $\sigma_{\max}=1,85[\text{MPa}]$, $\sigma_{\min}=-69,46[\text{MPa}]$.



obr. 25 Normálové napětí v ose X (celkový pohled+detail)

Normálové napětí v ose X Maximální $\sigma=49,98$ [MPa]

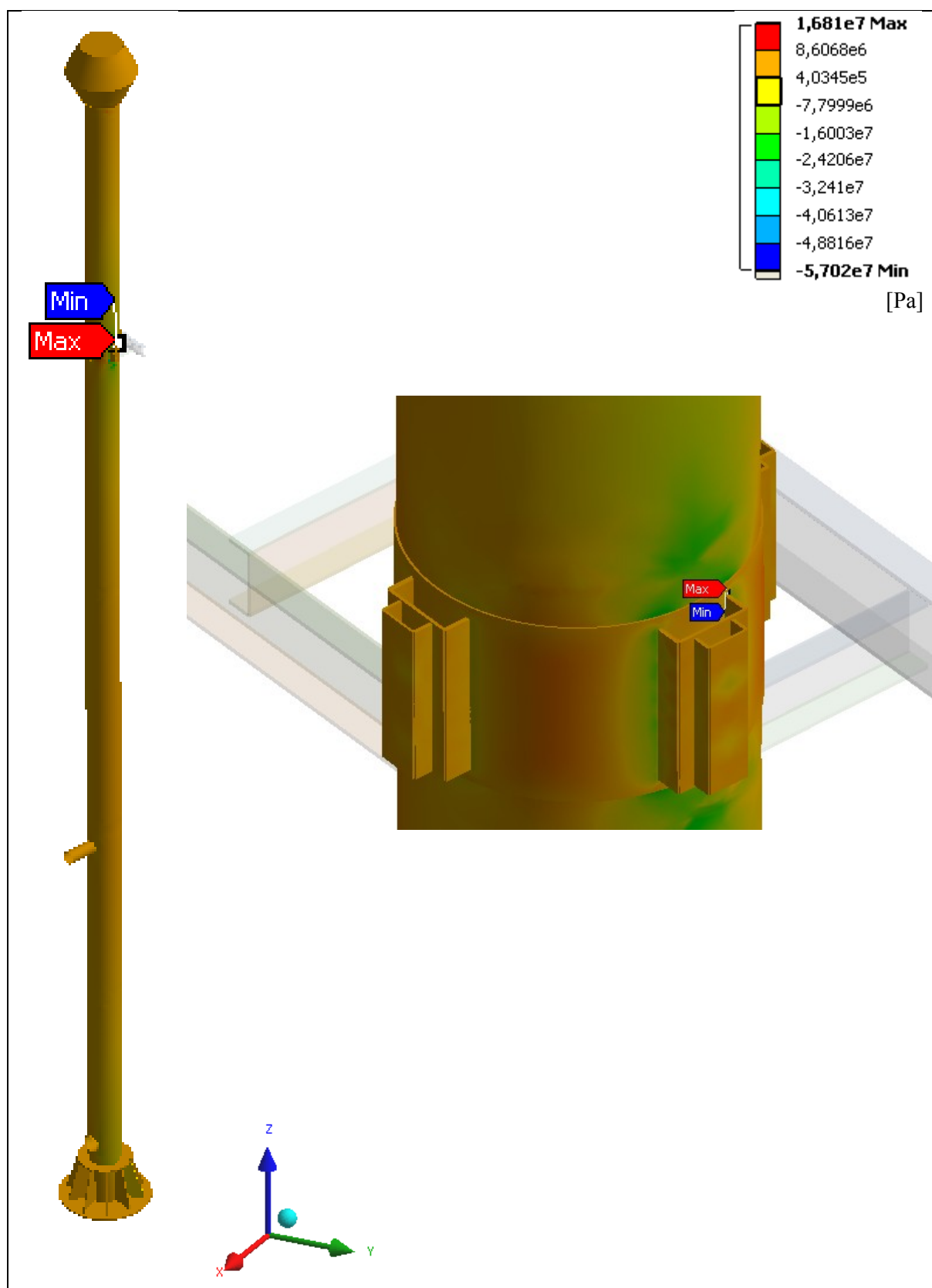
Minimální $\sigma=-60,9$ [MPa]



obr. 26 Normálové napětí v ose Y (celkový pohled+detail)

Normálové napětí v ose Y Maximální $\sigma=20,52[\text{MPa}]$

Minimální $\sigma=-35,36[\text{MPa}]$



obr. 27 Normálové napětí v ose Z (celkový pohled+detail)

Normálové napětí v ose Z Maximální $\sigma=16,81[\text{MPa}]$
Minimální $\sigma=-57,02[\text{MPa}]$

5 ZÁVĚR

Z předběžného analytického řešení byly určeny tloušťky plechů, pro které při působení vnější sil nebylo překročeno maximální dovolené napětí. To se určilo z meze kluzu zvolené oceli S235 JR a uvážil se koeficient bezpečnosti $k_s=1,5$. Pro všech 5 segmentů komínu byly následně určeny stejné tloušťky, a to 5 mm z důvodu výrobitelnosti normalizovaných plechů v požadovaných rozměrech. U této tloušťky plechu se maximální lokální napětí zdaleka nepřiblížila k dovolenému napětí. Poté se přistoupilo k hlavnímu výpočtu, a to numerickou metodou MKP na 3D modelu, který už věrněji odpovídal skutečnosti.

Oproti předběžnému analytickému výpočtu se výsledky poněkud lišily, už jen z toho důvodu, že model pro analytický výpočet byl značně zjednodušený a řešením byla jen normálová napětí v ose myšleného nosníku. MKP výpočet ukázal, že napětí ovlivňují hlavně geometrické tvary, členitosti prvků a konstrukční vruby. Proto největší napětí vznikla právě v posuvném uložení. Z hlediska geometrie to byl komplexnější problém, který nebylo možné v analytickém řešení podchytit. Maximální napětí tedy vyšla na styku navařeného U profilu, který při zatížení svou přírubou tlačil na tubus komínu. Napětí byla tlaková v řádech desítek MPa (přesné hodnoty viz tabulka 4.). Jelikož dovolené napětí bylo 156,7 MPa, které s rezervou nebylo překročeno, lze označit návrh tloušťek plechů za vyhovující. Pro celou výšku komínu byla navržena tloušťka plechu 5 mm z oceli S235JR.

Tabulka 4 Srovnání výsledků

Napětí		Velikost [MPa]	Dovolené napětí [MPa]
Redukované dle HMH		60,9	156,7
První hlavní	Max	53,7	
	min	-3	
Druhé hlavní	Max	16,8	
	min	-45,6	
Třetí hlavní	Max	1,9	
	min	-69,5	
Normálové v ose X	Max	50,0	
	min	-60,9	
Normálové v ose Y	Max	20,5	
	min	-35,4	
Normálové v ose Z	Max	16,8	
	min	-57,1	

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Technická dokumentace komínu
- [2] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4:Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [3] Němec, J., Dvořák, J., Höschl, C. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*, Technický průvodce 69, SNTL, Praha 1989
- [4] Janíček, P., Ondráček, J., Vrbka, J. *Mechanika těles – pružnost a pevnost I.*, Skriptum VUT Brno, Ediční středisko VUT Brno, 1987

PODĚKOVÁNÍ

Na závěr bych chtěl velmi poděkovat Ing. Richardu Klučkovi za odborné vedení, cenné rady a hlavně za jeho drahocenný čas.